

摩擦磨损与润滑

高速动车组车轮偏磨影响因素与限值研究

祁亚运^{1,2}, 戴焕云³, 干锋³, 桑虎堂³, 王瑞安¹

(1.重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2.中车长江车辆有限公司, 武汉 430212;
3.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031)

摘要: **目的** 高速动车组在运营过程中的轮轨磨耗严重威胁着运营安全和运营经济性, 车轮偏磨对车辆的运行性能具有重要影响。探究高速动车组车轮发生偏磨的原因, 从而提出对应的抑制措施。**方法** 通过实测数据, 统计分析动车组偏磨问题和演化规律, 并对不同车轮偏磨下的轮轨静态接触参数进行分析; 建立高速动车组车辆模型和 Jendel 车轮磨耗模型, 分析偏磨产生的机理和影响因素, 主要从 4 个方面进行探究, 包括左右轮表面硬度、左右侧转臂节点参数、线路分布和钢轨廓形的不对称性; 通过建立轮对刚柔耦合模型, 对不同车速下的车轮偏磨限值进行研究。**结果** 磨耗里程为 200 000 km, 当硬度差为 0、5H、10H 时, 右侧车轮的磨耗深度分别为 0.954、0.966、0.973 mm。当右侧转臂节点刚度减小为 5 MN 时, 右侧车轮的磨耗深度减小了 5%。当左右钢轨廓形不对称时, 左侧车轮的磨耗比右侧的磨耗增大了 15.8%。当速度为 300、350、400 km/h 时, 轮径差限值分别为 2.4、2.1、1.7 mm。**结论** 左右车轮的表面硬度、左右侧转臂节点参数、线路分布和钢轨廓形不对称性是引起车轮偏磨的主要诱因, 在服役过程中需对影响车轮偏磨的车辆和线路参数进行有效监控, 并根据运营状态及时进行检修。

关键词: 高速动车组; 车轮偏磨; 轮轨接触; 磨耗预测; 安全限值

中图分类号: U270.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2023)05-0051-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.05.005



扫码查看文章讲解

Influencing Factors and Limits of Asymmetrical Wheel Wear of High-Speed EMUs

QI Ya-yun^{1,2}, DAI Huan-yun³, GAN Feng³, SANG Hu-tang³, WANG Rui-an¹

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. CRRC YANGTZE Co., Ltd., Wuhan 430212, China;

3. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The wheel-rail wear problem in operation of high-speed EMUs poses a serious threat to their operational safety

收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-09-29

Received: 2022-04-14; Revised: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51975485, U2268211); 中国博士后科学基金项目 (2021M702978); 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室开放课题 (HJGZ2022114); 浙江省城市轨道交通智能运维技术与装备重点实验室开放基金 (ZSDRTKF2023003)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51975485, U2268211); China Postdoctoral Science Foundation (2021M702978); Open Project of State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure (HJGZ2022114); Open Project of Key Laboratory of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology & Equipment of Zhejiang Province (ZSDRTKF2023003)

作者简介: 祁亚运 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为轮轨磨耗。

Biography: QI Ya-yun (1990-), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: wheel rail wear.

通讯作者: 戴焕云 (1966—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为轨道车辆设计。

Corresponding author: DAI Huan-yun (1966-), Male, Doctor, Professor, Research focus: railway vehicle design.

引文格式: 祁亚运, 戴焕云, 干锋, 等. 高速动车组车轮偏磨影响因素与限值研究[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 51-60.

QI Ya-yun, DAI Huan-yun, GAN Feng, et al. Influencing Factors and Limits of Asymmetrical Wheel Wear of High-Speed EMUs[J]. Surface Technology, 2023, 52(5): 51-60.

and economy, and asymmetrical wheel wear has an important impact on vehicle operation performance. This paper investigated the causes of asymmetrical wheel wear in high-speed EMUs, and proposed effective measures to suppress asymmetrical wheel wear. Firstly, through the actual measurement data, statistical analysis on the asymmetrical wheel wear and the evolution of high-speed EMUs were conducted, and the static wheel-rail contact parameters under different asymmetrical wheel wear were analyzed. When the lateral displacement was smaller than 2 mm, the adhesion area was smaller when the asymmetrical wheel wear was larger. When the lateral displacement was less than 8 mm, the longitudinal creepage gradually increased as the asymmetrical wheel wear increased, which tended to intensify wheel and rail wear. Then a high-speed EMU model and a Jendel wheel wear model were established to analyze the mechanism of asymmetrical wheel wear and the influencing factors, mainly from four aspects: the wheel surface hardness of the left and right wheels, the nodal parameters of the left and right side rotary arms, the line distribution and the asymmetry of the rail profile of left rail and right rail. Finally, the asymmetrical wheel wear limits of different vehicle speeds were investigated by a wheelset rigid-flexible coupling model. When there was a hardness difference between the wheel surfaces, which would cause a difference in wear between the left and right wheels, and when the hardness decreased, the wheel wear increased further. At 200 000 km, when the wheel surface hardness difference was 0, 5H and 10H, the wheel wear depth on the right side was 0.954 mm, 0.966 mm and 0.973 mm. When the wear mileage increased, the left and right wheel wear increased. When the wear mileage was 200 000 km, the wear depth was 0.967 mm for the left wheel and 0.92 mm for the right wheel with a reduction of 5%. Therefore, the difference in stiffness of the rotary arm nodes had an important effect on the formation of asymmetrical wheel wear during wheel operation. When the line distribution changed, the left and right wheel wear had a greater change, too much left curves led to a state of greater force on the left side of the wheel, the depth of wear was greater. When the wear mileage was 200 000 km, the left side wheel wear depth was 0.98 mm and 0.941 mm. When there was asymmetrical wear of the left and right rails in a local section of the line, there was an asymmetry in the distribution of wheel-rail contact points, resulting in a change in the contact force between the left and right wheels and resulting in a difference in wheel wear. The limit of the asymmetrical wear at 300 km/h, 350 km/h and 400 km/h were 2.4 mm, 2.1 mm and 1.7 mm respectively. Asymmetries in the surface hardness of the left and right wheel, the nodal parameters of the left and right rotary arms, the line distribution and the asymmetry of the rail profiles are the main causes of asymmetrical wheel wear. During the service process, the vehicle and line parameters that affect the asymmetrical wheel wear need to be effectively monitored.

KEY WORDS: high-speed EMUs; asymmetrical wheel wear; wheel-rail contact; wear prediction; safety limit

在运营过程中, 高速度动车组很容易产生车轮偏磨现象。车轮偏磨会对动车组车辆的动力学性能和轮轨接触疲劳性能造成严重影响, 同时缩短了车轮的镟修周期, 对高速动车组运营的经济性造成影响^[1-3]。目前, 针对动车组的车轮偏磨问题并无较好的解决办法, 因此需要进一步研究高速动车组的车轮偏磨问题, 并提出相应的抑制措施。

国内外学者探索了车轮偏磨对车辆动力学的影响。池茂儒等^[4]通过对有偏磨的转向架进行受力分析和数值仿真, 根据偏磨量划分为 3 个稳定区, 并对不同型式车轮的安全性指标进行了分析^[5]。Sawley 等^[6]对直线轨道上车轮偏磨作用下的稳定性进行了研究。陈嵘等^[7]建立了车辆-道岔耦合动力学模型, 对车轮偏磨作用下道岔区域轮轨接触和通过道岔时的动力学响应进行了研究。韩鹏等^[8]对车轮偏磨作用和车轮磨耗作用下的动力学响应进行了分析。还有学者对偏磨作用下机车车辆动力学响应进行了研究^[9-10]。Frohling 等^[11]通过试验与仿真结合的手段对偏磨作用下的车辆动力学特性进行了研究。Qi 等^[12]探究了地铁车辆车轮磨耗问题, 并采用车轮型面优化, 进一步减小了磨耗。赵思琪等^[13]对车轮偏磨作用下有轨电车

通过道岔时的动力学响应进行了分析。王红兵等^[14]利用 UM 多体动力学软件分析了车轮偏磨对车轮磨耗和轮轨接触疲劳的影响。以上研究主要集中分析了车轮偏磨对经典动力学特性的影响。

对车轮偏磨作用下的轮轨关系和车轮磨耗进行分析是偏磨问题的另外一个研究热点, 丁军君等^[15]研究了重载货车的轮对安装偏角和车轮偏磨对车轮磨耗的影响, 结果表明, 车轮偏磨会缩短车轮磨耗寿命。Sui 等^[16]对货车车轮偏磨现象进行了现场调研和分析, 对不同偏磨作用下的车轮磨耗进行了预测。Zou 等^[17]分析了机车偏磨对轮轨接触的影响。Lyu 等^[18]对存在车轮轮径差的重载机车车轮疲劳进行了探究。Qi 等^[19]提出了变轨距动车组车轮型面优化方法, 进一步减小了磨耗。车轮偏磨对轨道车辆具有重要的影响, 前期研究集中于车轮偏磨对车辆动力学、车轮磨耗恶化及轮轨接触疲劳的影响, 对高速动车组这类速度较高车辆的车轮偏磨产生诱因的研究较少, 还需进一步明确高速动车组车轮偏磨的产生机理。由此, 文中拟对高速动车组车轮偏磨产生的诱因和影响因素进行详细分析, 探究不同速度下车轮偏磨的安全限值。

文中通过对高速动车组车轮偏磨数据的调查与分析, 探究车轮偏磨下的轮轨静态接触特性, 并建立高速动车组多体动力学车辆动力学模型和 Jendel 车轮磨耗模型, 对车轮偏磨产生的影响因素和偏磨安全限值进行研究。

1 车轮偏磨数据调查与分析

前期对我国某高速动车组车轮型面进行了长期的跟踪测试, 主要测试了 49 000、91 000、164 000、204 000 km 等不同里程下车轮的廓形。测试设备采用丹麦 Miniprof 测试仪^[20], 如图 1 所示。统计了测试车轮型面处理后的车轮磨耗深度和等效锥度, 如图 2 所示。图 2a 给出了实测相同磨耗里程下一列车车轮的磨耗深度, 可以看出, 左右、前后车轮的磨耗都存在一定偏差。从车轮磨耗深度统计图 (图 2b) 中可以看出, 在不同的磨耗里程下, 左右车轮的磨耗深

度始终不一致, 导致车辆在运行时左右轮的车轮偏磨问题一直存在, 转向架前后轮对其车轮的偏差也较大。车轮偏磨量最大达到 0.3 mm, 车辆前后轮对之间也存在车轮偏磨。等效锥度如图 2c 所示, 在不同里程下左右车轮的等效锥度都存在差异。



图 1 Miniprof 车轮型面测量

Fig.1 Miniprof wheel profile measurement

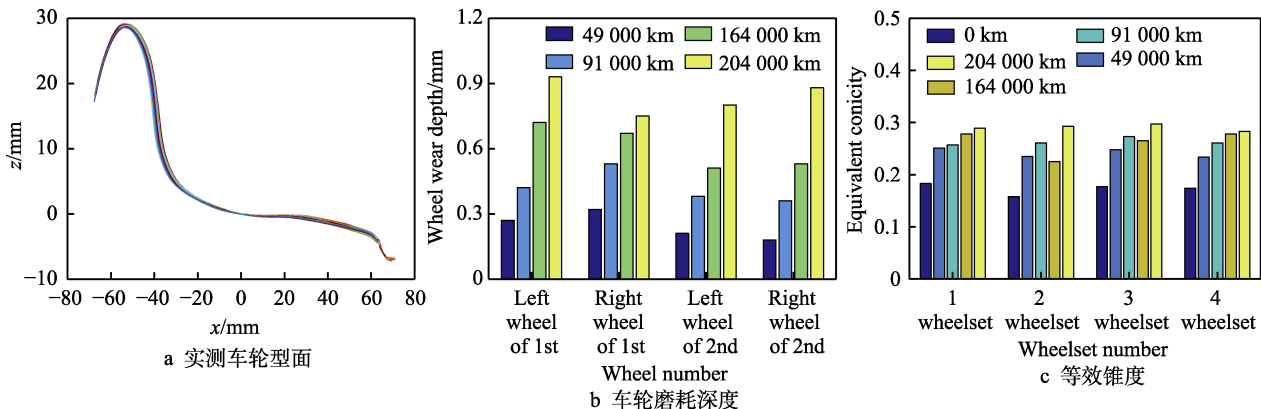


图 2 实测车轮偏磨数据分析

Fig.2 Analysis of measured asymmetrical wheel wear data: a) measured wheel profile; b) wheel wear depth; c) equivalent conicity

2 车轮偏磨下的轮轨静态接触分析

采用三维滚动接触理论分析车轮偏磨作用下的轮轨静态接触特性^[21], 车轮偏磨对轮轨接触关系会产生影响, 进而影响其轮轨接触力。这里分析了不同横移量下的接触斑面积、蠕滑率和接触斑等。选取 S1002CN 车轮型面和 Rail60 钢轨型面进行分析, 左轮为标准半径 (460 mm), 右侧车轮半径分别减小 0、0.5、1 mm, 采用 CONTACT 算法^[21]分别计算不同车轮偏磨程度下的轮轨静态接触参数。Kalker^[21]利用三维滚动接触理论编写了 FORTRAN 程序 CONTACT, 利用弹性力学和 Gauss 数值积分相结合的方法, 求出了轮轨三维接触的精确解。

利用 Bossinesq-Cerruti 公式, 最大余能原理可以表示为式 (1) — (2)。

$$\min_{p_{ij}} C = \frac{1}{2} p_{ii} A_{iij} p_{jj} + \{ (g_{0j} - q) p_{j3} + (W_{j\tau} - u_{j\tau}) p_{j\tau} \} A_0 \quad (1)$$

$$p_{j3} \geq 0, |p_{j\tau}| \leq b_j, \forall x \in A_c, A_0 \sum_j p_{j3} = p \quad (2)$$

式中: A_{iij} 为影响系数; p_{ij} 、 p_{j3} 为作用在 i 和 j

单元上的法向应力; g_{0j} 为 J 单元中心处轮轨变形后接触面之间的法向间隙; q 为轮轨在 x_3 方向的弹性压缩量; $W_{j\tau}$ 为刚性滑动量, $u_{j\tau}$ 为轮轨滚动接触过程中 J 单元中心处的弹性位移差; A_c 为接触斑滑动区域; p 为轮轨法向力; b_j 为 J 单元中心处的极限摩擦力; M 为单元总数。

在计算时, 轴质量为 17 t, 轮轨间的摩擦因数为 0.3, 轮轨材料的切变模量为 82 GPa, 泊松比为 0.28; 计算时与之匹配的钢轨型面为 CHN60。利用 CONTACT 程序的计算结果如图 3 所示, 主要包括了黏着区面积、滑动区面积和纵向蠕滑率。从图 3 可以看出, 当横移量小于 2 mm 时, 车轮偏磨较大时黏着区面积较小; 当横移量小于 8 mm 时, 随着车轮偏磨的增大, 纵向蠕滑率逐渐增大, 容易加剧轮轨的磨耗。在车轮偏磨量分别为 0、0.5、1 mm 时, 接触斑如图 4 所示。在轮对横移量为 0.5 mm 时的接触斑中, 黄色区域为接触斑滑动区, 青色区域为接触斑黏着区, 具体数值如图 3 所示。从图 4 中可以看到横移量为 0 mm 时的接触斑分布情况, 当车轮偏磨量增大时, 黏着区面积减小, 滑动区面积增大。

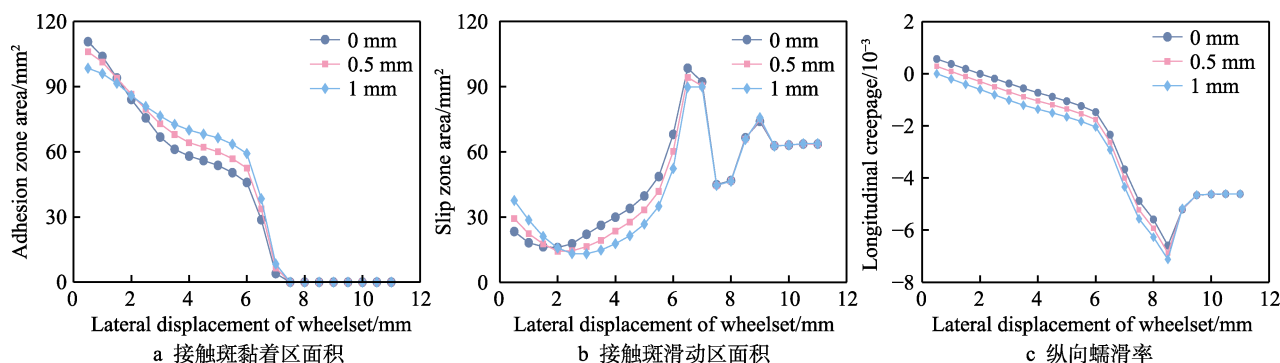


图3 三维滚动接触结果

Fig.3 Three-dimensional rolling contact results: a) area of contact patch adhesion zone; b) area of contact patch sliding zone; c) longitudinal creepage

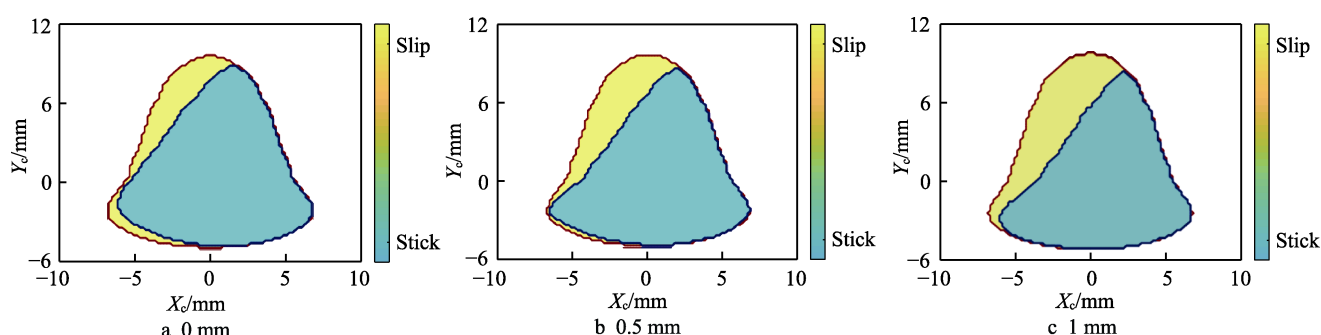


图4 轮轨接触斑

Fig.4 Wheel-rail contact patch

3 动力学模型建立和响应分析

3.1 动车组动力学模型建立

动力学模型是动力学响应分析和车轮磨耗计算的基础,利用多体动力学理论建立高速动车组车辆动力学模型。动力学模型主要包括2个转向架和1个车体,转向架系统主要包括4个轮对、4个轴箱、2个构架、4个电机、4个齿轮箱,共计19个刚体。转向架的三维结构如图5a所示,考虑了轴箱和电机的旋转自由度,其余刚体都考虑6个自由度。利用一系悬挂装置和二系悬挂连结刚体,在多体动力学软件

SIMPACK 中建立整车动力学模型,如图5所示。钢轨型面采用 CHN60 廓形,轮轨法向力采用 Hertz 接触算法^[22],轮轨切向力采用 FASTSIM 算法^[23]。该动力学模型的有效性已经在文献[24]中验证。

3.2 磨耗预测分析

在预测磨耗时,需要将 SIMPACK 计算的轮轨垂向力和蠕滑力进一步在接触斑上细分计算,轮轨法向力的计算依旧采用 Hertz 接触模型,轮轨蠕滑力采用瑞典 Sichani 博士的 FASTRIP 模型^[25]求解。基于轮轨赫兹接触理论,该模型将轮轨接触斑划分为黏着区和滑动区,在算法中分别修正了 ξ 、 η 、 ψ 和柔度系数,

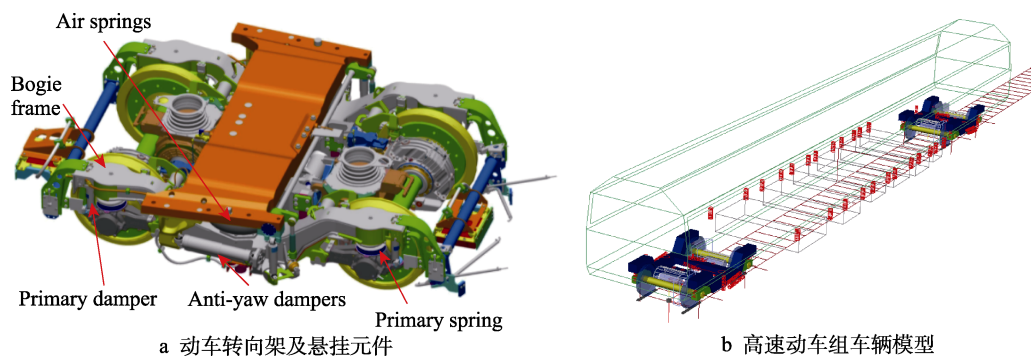


图5 动车组转向架三维模型和车辆动力学模型

Fig.5 3D model of bogie and suspension components; b) model of high-speed EMUs

通过 L 分别对这 2 个区域内的切向应力和滑动分布进行求解。首先划分为滑动区域和黏着区域, 见式 (3) — (5)。

$$\begin{cases} x > -a(y) + 2d(y) & (x, y) \notin A_s(t) \\ x \leq -a(y) + 2d(y) & (x, y) \in A_s(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$a(y) = a\sqrt{1 - (y/b)^2} \quad (4)$$

$$d(y) = \frac{\sqrt{\eta^2 + (1 - \psi^2)(\xi - \psi y/a)^2 + \eta\psi}}{1 - \psi^2} \frac{a}{1 - \psi} \quad (5)$$

式中: $A_s(t)$ 为接触斑滑动区域; (x, y) 分别为接触斑区域内离散点的坐标; a 、 b 为轮轨接触斑的长半轴和短半轴; ψ 为泊松比; ξ 、 η 、 ψ 分别为与纵向蠕滑率、横向蠕滑率和自旋蠕滑率相关的 3 个无量纲系数, 由式 (6) 给出。

$$\begin{cases} \xi(y) = -\frac{G}{2\mu p_0(y)} v_x \\ \eta(y) = -\frac{G}{2\mu p_0(y)} (1 - y)v_y \\ \psi(y) = -\frac{G}{2\mu p_0(y)} a_0\phi \end{cases} \quad (6)$$

式中: G 为轮轨材料的等效剪切模量; p_0 为轮轨之间的接触摩擦因数; $p_0(y)$ 为该条带上的最大法向接触应力; $v_x(y)$ 、 $v_y(y)$ 和 $\phi_y(y)$ 为该条带中心坐标处的纵向蠕滑率、横向蠕滑率和自旋蠕滑率。

对应的纵向蠕滑力、横向蠕滑力和自旋蠕滑力矩通过式 (7) 进行计算。

$$\begin{cases} F_x = \iint_{C_p} f_x(x, y) dx \\ F_y = \iint_{C_p} f_y(x, y) dx \\ M_{cz} = \iint_{C_p} [xf_y(x, y) dx - yf_x(x, y) dx] dA \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_p 为轮轨接触斑区域; $f_x(x, y)$ 为纵向切应力; $f_y(x, y)$ 为横向切应力。

文中在车轮磨耗计算时采用 KTH 提出的 Jendel 车轮磨耗模型^[26], 该模型基于 Archard 磨耗模型^[27], 并对不同磨耗区域进行划分。将轮轨接触斑划分为 $x \times y$ 个单元, 可以计算每个接触斑的磨耗体积, 见式 (8)。

$$V_{\text{wear}} = \begin{cases} k_w(x, y) \frac{N(x, y)d(x, y)}{H} & (x, y) \in A_s(t) \\ 0 & (x, y) \notin A_s(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_w 为磨耗系数; H 为车轮表面硬度; N 为接触斑上的法向力; d 为相对滑动速度。

磨耗系数是利用试验反复调整得出的不同接触工况下的车轮磨耗比例系数, 磨耗系数的选取通常影响着磨耗预测精度。文中的磨耗系数先按图 6 中的数据选取。

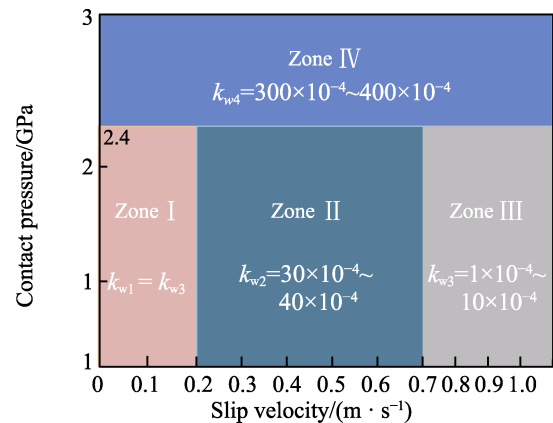


图 6 磨耗系数分布

Fig.6 Distribution of wear coefficients

在设置仿真线路时, 对实际的高速线路数据进行统计分析, 轨距为 1 435 mm, 轨底坡为 1 : 40。在仿真分析中采用的高速线路运行工况分布列于表 1^[28]。

表 1 高速线路分布^[28]
Tab.1 Distribution of high speed lines^[28]

Radius of curve/ m	Super-elev ation/mm	Gentle curve length/m	Circular curve length/m	Running speed/ (km · h ⁻¹)	Percent- age/%
Straight line				300	60
12 000	80	220	480	300	1
9 000	100	300	320	300	7
8 000	120	340	250	300	8
7 000	145	360	210	300	10
5 500	165	360	210	300	7
5 000	120	360	210	300	7

首先利用车辆动力学模型和磨耗模型计算了无车轮偏磨时的车轮磨耗深度, 如图 7a、b 所示。在仿真时, 由于线路具有对称性, 因此两侧车轮磨耗接近。当里程达到 200 000 km 时, 车轮的磨耗深度为 0.954 mm。采用实测数据进一步验证磨耗模型的正确性, 在车轮偏磨为 0 mm 时, 采用新轮预测不同磨耗里程下车轮的磨耗深度, 并实测一位轮对左右轮车轮的磨耗深度, 如图 7c 所示。可以看出, 预测值与实测磨耗深度很接近, 同时存在一定误差。由于实测磨耗深度存在车轮偏磨, 因此在 200 000 km 时左右轮的偏差相对较大, 但都在允许范围内, 表明该磨耗模型具有一定的可靠性。

4 动车组车轮偏磨机理分析

车轮偏磨是在运行过程中高速动车组常出现的现象。目前对左右轮差异化磨耗的机理尚不明确, 需要进一步探讨。这里主要从左右车轮的表面硬度差、左右侧转臂节点参数、线路分布和左右侧钢轨型面不

对称4个方面探讨车轮偏磨产生的原因,为进一步抑制车轮偏磨提供指导。

4.1 左右轮硬度差

在车轮镟修初期,由于加工工艺的影响,存在表面的随机硬度差。同时,由于磨耗过程中左右轮的硬度存在一定差异,因此车轮磨耗也会有所差异。为了进一步探究硬度差对差异化磨耗的影响,取左轮硬度为300H,右轮硬度为295H、290H,车轮左右轮的磨耗演变如图8所示。从图8c可以看出,当左右轮存在硬度差时,车轮磨耗也会有所差异。在磨耗里程为200 000 km,左右轮硬度差为5H时,左右侧车轮的磨耗深度分别为0.954 2、0.966 4 mm;在左右轮硬度差为10H时,左右侧车轮的磨耗深度分别为0.958 2、

0.977 3 mm。可以看出,当车轮表面存在硬度差时,会造成左右车轮磨耗的差异,硬度减小时车轮磨耗进一步增大。

4.2 转臂节点刚度的差异

转臂节点是高速动车组连接轮对轴箱装置和转向架的重要结构。由于转臂节点内部由橡胶件构成,随着运营里程和时间的增大,其结构件内部因安装和老化会出现左右侧转臂节点参数的差异,因此在分析左右车轮差异化磨耗时,需要进一步考虑转臂节点刚度的影响。在仿真工况设计时,将左侧转臂节点定位刚度设置为40 MN/m,右侧刚度设置为35 MN/m,利用前面建立的模型探究转臂节点刚度差异对车轮偏磨的影响,如图9所示。随着磨耗里程的增大,左

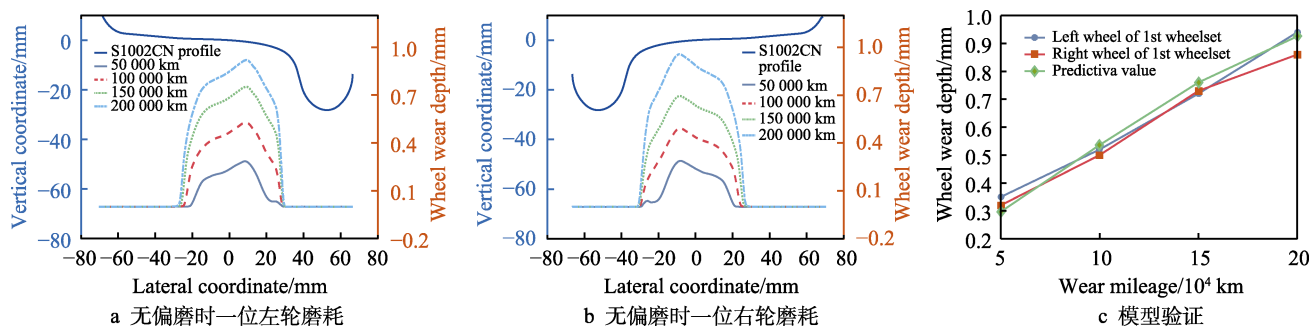


图7 无偏磨时车轮磨耗长距离仿真预测

Fig.7 Simulation and prediction of wheel wear of long distances without asymmetrical wear: a) left wheel of first wheelset without asymmetrical wear; b) right wheel of first wheelset without asymmetrical wear; c) model validation

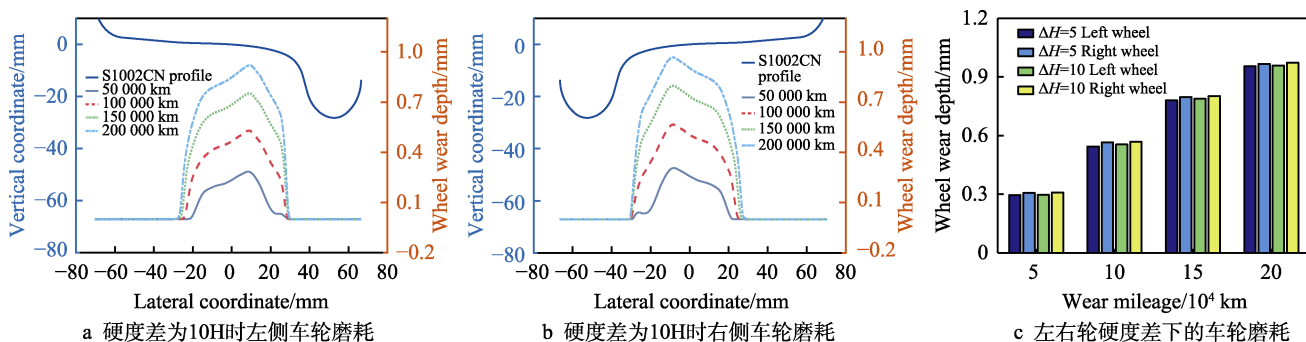


图8 车轮硬度差对车轮偏磨的影响

Fig.8 Effect of wheel hardness difference on asymmetrical wheel wear: a) wheel wear of left wheel when the hardness difference is 10H; b) wheel wear of right wheel when the hardness difference is 10H; c) wheel wear with hardness difference between left and right wheels

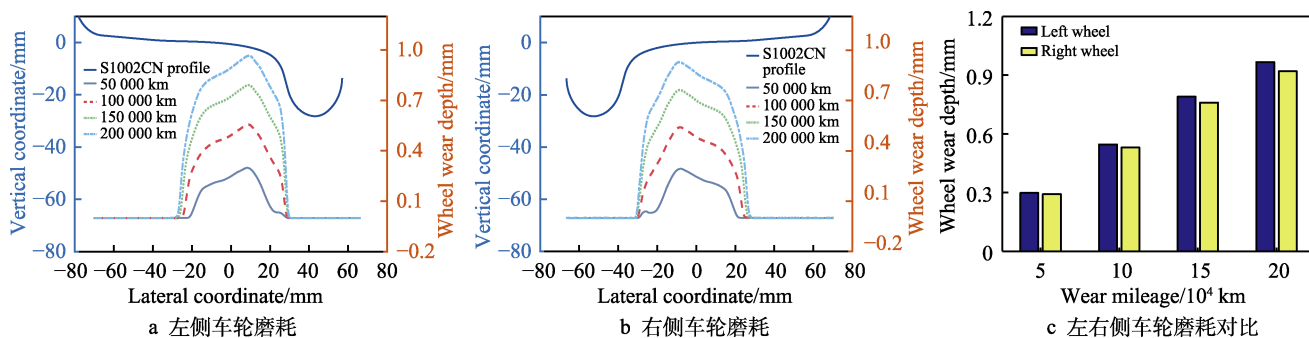


图9 左右侧转臂节点刚度差对车轮偏磨的影响

Fig.9 Effect of the difference in stiffness of the left and right side rotary arm nodes on asymmetrical wheel wear: a) left wheel wear; b) right wheel wear; c) comparison of left and right side wheel wear

右车轮的偏磨越大。当磨损里程为 200 000 km 时, 左侧车轮的磨损深度为 0.967 mm, 右侧车轮的磨损深度为 0.92 mm, 减小了约 5%。转臂节点左侧较大是因在设置刚度时左侧刚度较大、右侧刚度较小, 导致左侧车轮在曲线通过时的通过性能较差, 轮轨作用更强, 导致磨损较大。由此可见, 转臂节点刚度的差异对车轮服役过程中车轮偏磨的形成具有重要影响。

4.3 线路分布的影响

高速线路的小曲线半径较小, 一些大曲线的分布对车轮差异化磨损有着重要的影响。通过之前的研究可以发现, 曲线外侧车轮磨损通常大于曲线内侧。在进行模型验证时发现, 曲线分布具有对称性, 将每个曲线半径对称分布设置为左曲线和右曲线。在设置线路时, 将曲线半径分别为 9 000、7 000、5 000 m 的曲线设置为左曲线, 采用不对称设置, 在不同里程下

车轮的磨损深度统计结果如图 10 所示。可以看出, 当线路分布发生变化时, 左右侧车轮磨损发生了较大的变化, 左曲线过多导致左侧车轮长期作用力更大, 磨损深度更大。当磨损里程为 200 000 km 时, 左侧车轮的磨损深度为 0.98、0.941 mm。由于采用线路不对称设置, 因此轮对左侧车轮在通过这 3 个左曲线时左侧车轮轮轨相关作用更加剧烈, 导致左侧磨损更大。由此可见, 线路分布的左右不对称也是造成动车组车轮偏磨的重要原因。

4.4 钢轨型面的不对称性

在长期服役过程中, 车辆的钢轨也会出现不均匀磨损。当线路局部路段出现左右钢轨廓形不对称时, 轮轨接触点分布出现不对称, 导致左右侧车轮接触力发生变化, 出现了磨损差异^[29]。采用实测左右钢轨廓形进行轮轨接触和磨损分析(如图 11 所示), 可以看

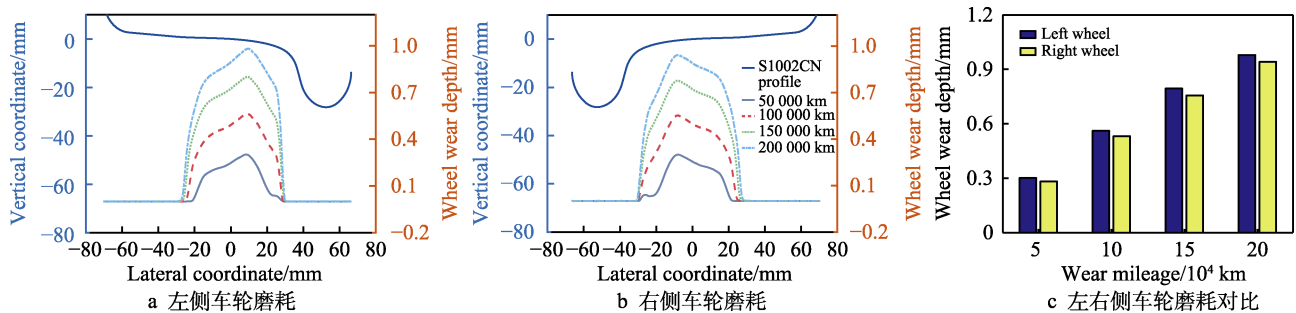


图 10 线路分布对车轮偏磨的影响

Fig.10 Effect of line distribution on asymmetrical wheel wear: a) left wheel wear; b) right wheel wear; c) comparison of left and right wheel wear

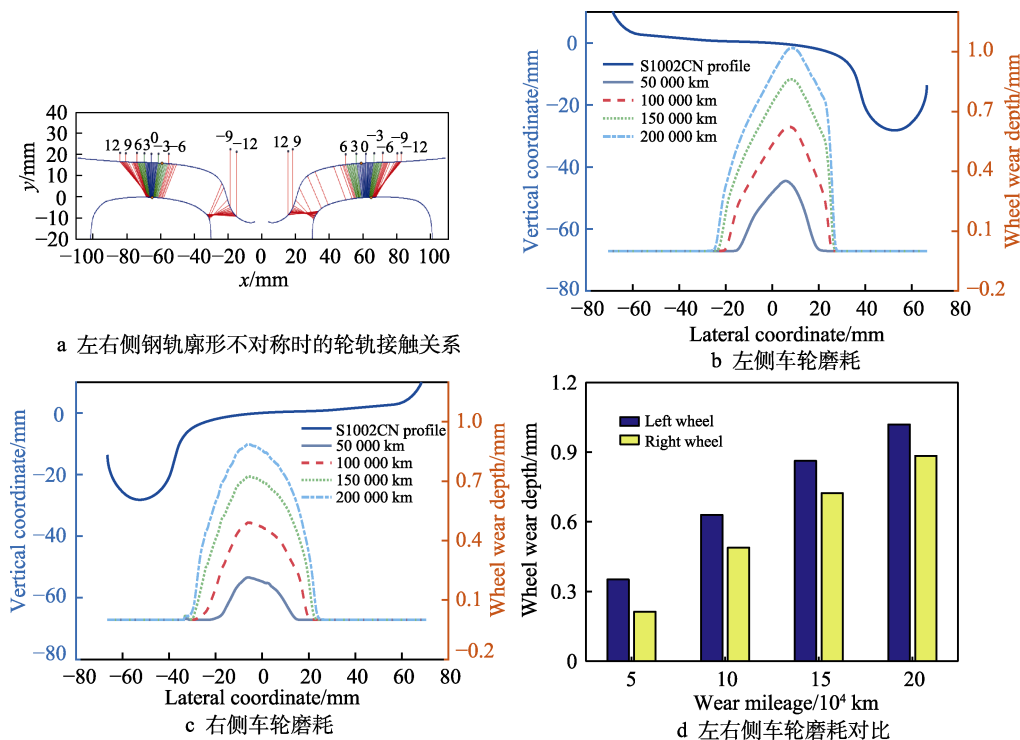


图 11 钢轨廓形不对称对车轮偏磨的影响

Fig.11 Effect of rail profile asymmetry on asymmetrical wheel wear: a) wheel-rail contact relations when the left and right side rail profiles are asymmetrical; b) left wheel wear; c) right wheel wear; d) comparison of left and right wheel wear

出, 左侧车轮在 0~20 mm 范围内的磨耗较集中, 且车轮磨耗幅值较大。在不对称钢轨型面匹配下运行 200 000 km 后可以看出, 磨耗差异很大, 左侧车轮的磨耗深度分别为 0.351、0.63、0.862、1.019 mm, 右侧车轮的磨耗深度分别为 0.213、0.488、0.723、0.88 mm。可知磨耗里程为 200 000 km 时, 左侧车轮的磨耗深度比右侧车轮的磨耗深度大 15.8%。左侧车轮磨耗更大主要是因不对称的轮轨接触, 导致左侧轮轨接触点更加集中。

经过以上研究可以发现, 左右侧车轮差异化磨耗的原因复杂, 是车辆表面硬度差、悬挂参数服役中性性能恶化造成参数不对称、线路分布差异和钢轨型面不对称等因素综合作用的结果, 且具有很强的随机性。线路分布差异和钢轨型面不对称对车轮偏磨的影响较大, 车辆参数的差异化对偏磨的影响较小, 因此需要进一步提高车辆运维的精确度, 对车辆参数做到有效监测。同时, 针对线路不对称分布, 可以采取掉头跑等措施减小其影响, 还需进一步提高高速线路的打磨和运维标准, 减小钢轨廓形的不对称性。

5 动车组车轮偏磨限值

为了进一步探究高速动车组车轮偏磨的限值, 以研究不同速度等级下的车轮偏磨限值。为了真实反映轮轨垂向力作用, 在计算限值时采用轮对刚柔耦合模型, 考虑轮对弹性进行仿真计算。建立刚柔耦合模型时, 轮对网尺寸控制在 5 mm。利用 Guyan 矩阵缩减方法生成子结构模型, 结合整车动力学模型, 建立轮对刚柔耦合动力学模型。在模型中, 考虑轮对的前 15 阶模态, 以分析不同速度下的车轮偏磨限值。

轮轨垂向力是衡量车辆运行安全性的重要指标, 根据 95J01-L《高速试验列车动力车强度及动力学性能规范》^[30]可知, 高速动车组的轮轨垂向力不应超过 170 kN, 因此分别计算了 300、350、400 km/h 下的高速动车组车轮偏磨限值, 如图 12 所示。分别计算车轮偏磨为 0.1~2.5 mm 时的轮轨垂向力, 可以看出速度为 300、350、400 km/h 时车轮偏磨限值分别为 2.4、2.1、1.7 mm。可见理论计算限值随着速度的增大而减小, 在实际工程应用中, 基于车轮镟修里程的规定, 车轮偏磨通常不会达到这么大。

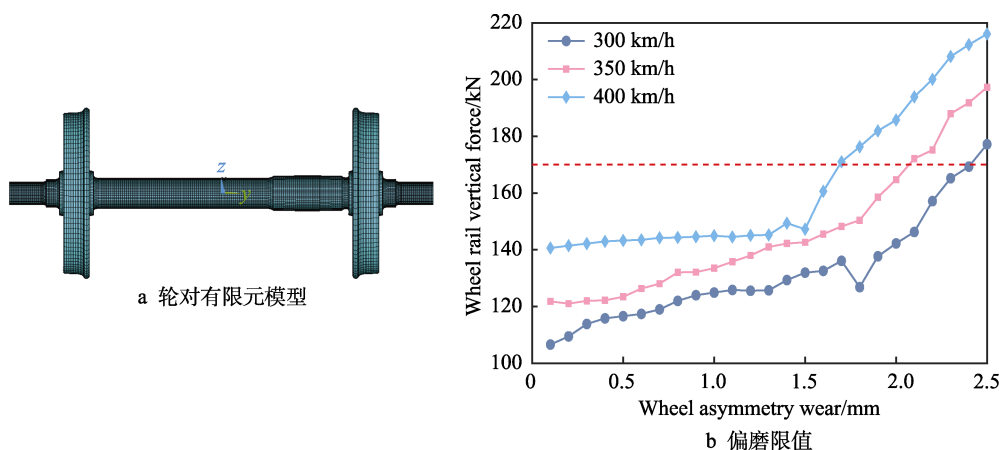


图 12 高速动车组车轮偏磨限值计算

Fig.12 Calculation of asymmetrical wheel wear limits for high-speed EMUs: a) finite element model of wheelset; b) asymmetrical wear limits

6 结论

首先对现场实测车轮廓形数据进行统计, 并对车轮偏磨作用下轮轨静态接触特性进行分析, 然后建立高速动车组车辆动力学模型和磨耗模型, 并采用该模型分析了诱发车轮偏磨的机理, 最后, 探究了高速动车组在不同车速下的车轮偏磨限值, 得到以下结论。

1) 通过实测数据可知, 在运营现场高速动车组车轮偏磨问题一直存在, 但幅值不大。通过静态接触分析可知, 当车轮的偏磨增大时, 轮轨纵向蠕滑率增大, 黏着区面积减小, 滑动区面积增大, 容易进一步增大轮轨磨耗和接触疲劳。

2) 左右轮的表面硬度、左右侧转臂节点偏差、线路分布和钢轨廓形不对称是引起左右轮差异化磨耗的主要诱因, 也是产生车轮偏磨的原因, 且具有很强的随机性。在服役过程中需要加强对车辆和轨道相关参数的监测。

3) 通过轮轨垂向力限值, 得到了不同速度下的车轮偏磨限值。在速度为 300、350、400 km/h 时, 车轮偏磨限值分别为 2.4、2.1、1.7 mm。

参考文献:

[1] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出

- 版社, 2004: 89-102.
- JIN Xue-song, LIU Qi-yue. Tribology of Wheel and Rail[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004: 89-102.
- [2] 金学松, 赵国堂, 梁树林, 等. 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策——车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 3-13.
- JIN Xue-song, ZHAO Guo-tang, LIANG Shu-lin, et al. Characteristics, Mechanisms, Influences and Counter Measures of High Speed Wheel/Rail Wear: Transverse Wear of Wheel Tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-13.
- [3] 朱海燕, 曾庆涛, 王宇豪, 等. 高速列车动力学性能研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(3): 57-92.
- ZHU Hai-yan, ZENG Qing-tao, WANG Yu-hao, et al. Research Progress on Dynamics Performance of High-Speed Train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(3): 57-92.
- [4] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 轮径差对车辆系统稳定性的影响[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 65-70.
- CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Influence of Wheel Diameter Difference on the Stability of Vehicle System[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 65-70.
- [5] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 轮径差对行车安全性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(5): 19-22.
- CHI Mao-ru, ZHANG Wei-hua, ZENG Jing, et al. Influence of Wheel-Diameter Difference on Running Security of Vehicle System[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 19-22.
- [6] SAWLEY K, URBAN C, WALKER R. The Effect of Hollow-Worn Wheels on Vehicle Stability in Straight Track[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1100-1108.
- [7] 陈嵘, 陈嘉胤, 王平, 等. 轮径差对道岔区轮轨接触几何和车辆过岔走行性能的影响[J]. 铁道学报, 2018, 40(5): 123-130.
- CHEN Rong, CHEN Jia-yin, WANG Ping, et al. Effect of Wheel Diameter Difference on Wheel-Rail Contact Geometry and Vehicle Running Behavior in Turnout Area[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(5): 123-130.
- [8] 韩鹏, 张卫华, 李艳, 等. 轮对磨耗与轮径差对高速列车动力学性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(6): 47-53.
- HAN Peng, ZHANG Wei-hua, LI Yan, et al. Influence of Wheelset Wear and Wheel Radius Difference on Dynamics Performances of High-Speed Train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(6): 47-53.
- [9] 周新胜. C₀—C₀ 轴式机车轮径差的研究[J]. 内燃机车, 2007(5): 18-21.
- ZHOU Xin-sheng. Study of Wheel Diameter Mismatch of C₀-C₀ Locomotive[J]. Railway-Locomotive and Motor Car, 2007(5): 18-21.
- [10] 张志超, 李谷, 储高峰, 等. 机车轴间轮径差对其动力学性能影响的仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(2): 11-16.
- ZHANG Zhi-chao, LI Gu, CHU Gao-feng, et al. Simulation Analysis of the Influence of Wheel Diameter Difference on the Locomotive Dynamic Performance[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(2): 11-16.
- [11] FRÖHLING R, EKBERG A, KABO E. The Detrimental Effects of Hollow Wear—Field Experiences and Numerical Simulations[J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1283-1291.
- [12] QI Y, DAI H, WU P, et al. RSFT-RBF-PSO: a Railway Wheel Profile Optimisation Procedure and Its Application to a Metro Vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(10): 3398-3418.
- [13] 赵思琪, 徐井芒, 马前涛, 等. 轮径差对有轨电车侧向过岔动力学性能影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2397-2406.
- ZHAO Si-qi, XU Jing-mang, MA Qian-tao, et al. Influence of Wheel Diameter Difference on Dynamic Performance of Tram Cars Passing through Turnout[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2397-2406.
- [14] 王红兵, 丁旺才, 宋杨法, 等. 轮径差对车轮踏面磨耗和滚动接触疲劳的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1277-1288.
- WANG Hong-bing, DING Wang-cai, SONG Yang-fa, et al. Analysis of the Influence of Wheel Diameter Difference on Wheel Tread Wear and Rolling Contact Fatigue[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1277-1288.
- [15] 丁军君, 黄运华, 李芾, 等. 铁道车辆非理想状态下的车轮磨耗行为[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 109-115.
- DING Jun-jun, HUANG Yun-hua, LI Fu, et al. Wheel Wear Behaviour of the Imperfect Railway Vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 109-115.
- [16] SUI Shun-qi, WANG Kai-yun, LING Liang, et al. Effect of Wheel Diameter Difference on Tread Wear of Freight Wagons[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 127: 105501.
- [17] ZOU Rui-ming, MA Wei-hua, LUO Shi-hui. Influence of the Wheel Diameter Difference on the Wheel/Rail Dynamic Contact Relationship of the Heavy Haul Locomotive[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2018, 16(2): 98-108.
- [18] LYU Kai-kai, WANG Kai-yun, LING Liang, et al. Influence of Wheel Diameter Difference on Surface Damage for Heavy-Haul Locomotive Wheels: Measurements and Simulations[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132: 105343.

- [19] QI Y, DAI H, GAN F, et al. Optimisation of Wheel Profile of Variable Gauge High-Speed Trains[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2023: 1-22. DOI: 10.1080/00423114.2023.2186250.
- [20] MBM Industry & Rail Tech GmbH MiniProf Wheel-MBM Industry & Rail Tech GmbH[EB/OL]. 2020. mbm-industrietechnik.com.
- [21] KALKER J J. Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990: 60-132.
- [22] HERTZ H. On the Contact of Elastic Solids[J]. *Reine und angewandte Mathematik*, 1882 (92): 156-171.
- [23] KALKER J J. A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1982, 11(1): 1-13.
- [24] 祁亚运, 戴焕云, 高浩, 等. 考虑驱动系统的高速列车动力学分析[J]. *振动工程学报*, 2019, 32(1): 176-183.
QI Ya-yun, DAI Huan-yun, GAO Hao, et al. Dynamic Analysis of High-Speed Train with Considering Drive System[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2019, 32(1): 176-183.
- [25] SHSICHANI M, ENBLUM R, BERG M. An Alternative to FASTSIM for Tangential Solution of the Wheel-Rail Contact[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2016, 54(6): 748-764.
- [26] JENDEL T. Prediction of Wheel Profile Wear—Comparisons with Field Measurements[J]. *Wear*, 2002, 253(1/2): 89-99.
- [27] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(8): 981-988.
- [28] 黄彩虹, 罗仁, 曾京, 等. 系统参数对高速列车车轮踏面凹陷磨耗的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(3): 55-62.
HUANG Cai-hong, LUO Ren, ZENG Jing, et al. Effect of System Parameters on Tread-Hollow Wear of High-Speed Train Wheels[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(3): 55-62.
- [29] QI Y, DAI H, GAN F, et al. Optimization of Rail Profile Design for High-Speed Lines Based on Gaussian Function Correction Method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023: 1-11. DOI: 10.1177/09544097231152564.
- [30] 95J01—L, 高速试验列车动力车强度及动力学性能规范[S].
95J01-L, Specification for Strength and Dynamic Performance of High-Speed Test Trains[S].

责任编辑：彭颀

(上接第 25 页)

- [90] JB/T 6073—1992, 金属覆盖层 实验室全浸腐蚀试验[S].
JB/T 6073—1992, Laboratory Total Immersion Corrosion Test for Metal Coverings[S].
- [91] GB/T 21838.4—2008, 金属材料 硬度和材料参数的仪器化压痕试验 第 4 部分: 金属和非金属覆盖层的试验方法[S].
GB/T 21838.4—2008, Metallic Materials—Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters—Part 4: Test Method for Metallic and Non-Metallic Coatings[S].
- [92] GB/T 26107—2010, 金属与其他无机覆盖层 镀覆和未镀覆金属的外螺纹和螺杆的残余氢脆试验 斜楔法[S].
GB/T 26107—2010, Metallic and Other Inorganic Coatings—Test for Residual Embrittlement in Both Metallic-Coated and Uncoated Externally-Threaded Articles and Rods—Inclined Wedge Method[S].
- [93] HB 5067.1—2005, 镀覆工艺氢脆试验 第 1 部分: 机械方法[S].
HB 5067.1—2005, Test Methods for Hydrogen Embrittlement Evaluation of Plating Processes—Part 1: Mechanical Method[S].

责任编辑：刘世忠